

PASARELA ATIRANTADA SOBRE EL MANZANARES EN MADRID

(CABLE-STAYED PEDESTRIAN BRIDGE UPON THE MANZANARES RIVER, MADRID)

Miguel A. Astiz, Javier Manterola, Miguel A. Gil

Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Carlos Fernández Casado S. L.

Fecha de recepción: 20-VI-03

ESPAÑA

562-156

RESUMEN

En este artículo se presenta una nueva pasarela atirantada que se acaba de construir en Madrid. Se trata de una estructura innovadora tanto por el esquema de atirantamiento como por la utilización de elementos tubulares para resolver tanto problemas estructurales como formales. En el artículo se tratan los cuatro aspectos fundamentales del proyecto: diseño, cálculo, construcción y comportamiento estructural. En cada uno de estos apartados se tratan específicamente los aspectos más característicos e innovadores del proyecto.

SUMMARY

A new cable-stayed pedestrian bridge which has just been built in Madrid is presented in this paper. The structure has an innovative design where tubular elements have been used to solve some specific structural and formal problems. Four aspects are mainly addressed in this paper: design, analysis, construction and structural behaviour. In each one of these parts the most characteristic and innovative aspects of the project are presented.

INTRODUCCIÓN

La nueva pasarela atirantada que se acaba de construir en Madrid se ha proyectado para sustituir a dos pasarelas que se construyeron en los años sesenta. El objeto del nuevo proyecto consiste en resolver los problemas que presentaban las pasarelas antiguas y en establecer un nuevo punto de referencia en la ciudad.

El proyecto de la nueva pasarela trata de cumplir dos condiciones opuestas: la estructura debe ser ligera pero al mismo tiempo estable ante las acciones exteriores estáticas y dinámicas. Al estar la pasarela atirantada, tanto el tablero como la torre sufren los efectos de las muy importantes componentes horizontales de las fuerzas en tirantes, y se trata de elementos muy sensibles ante estas acciones.

Los condicionantes funcionales en pasarelas metálicas ligeras tienen que ver con los desplazamientos y vibraciones, que deben limitarse para asegurar la comodidad y seguridad de los usuarios. Esto es especialmente impor-

tante en el caso de pasarelas urbanas, como ha quedado demostrado recientemente en las nuevas pasarelas que se han construido en París y Londres.

PROYECTO

El propósito de la pasarela consiste en conectar las dos orillas del río Manzanares. Aunque el río no es muy ancho, la pasarela debe cruzar también las dos calzadas de la autovía perimetral M-30 que discurren paralelas al río, una en cada orilla (Figura 1). En consecuencia, los gálibos vertical y horizontal son importantes (6 m y 85 m respectivamente). Además, el espacio para las rampas de acceso es muy reducido ya que hay sendas calles paralelas al río y a cada lado de la M-30; por otra parte, el diseño de dichas rampas se ve absolutamente condicionado por el respeto de las pendientes máximas para personas con movilidad reducida.

Las pasarelas antiguas eran vigas continuas de hormigón pretensado con una sección transversal en U en la que las

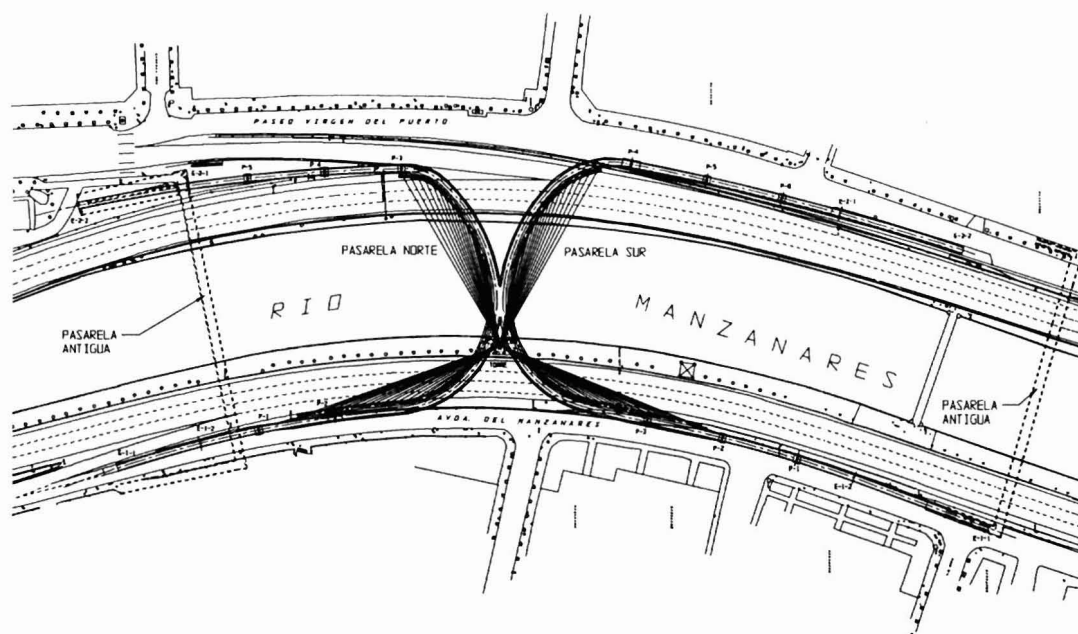


Figura 1.- Planta de la pasarela y su entorno.

almas verticales hacían las veces también de parapetos. Dado que dichos parapetos eran opacos y demasiado altos, se habían producido algunos problemas de seguridad entre los usuarios. Por otra parte, el uso exclusivo de escaleras hacía que el uso de las pasarelas por personas de movilidad reducida fuera prácticamente imposible.

Éstas fueron las razones principales que aconsejaron la sustitución de las viejas pasarelas por una o dos pasarelas proyectadas de acuerdo con los usos y normativas actuales. Las pasarelas son realmente necesarias ya que el río y la autovía dividen la ciudad en dos partes separadas que sólo se conectan mediante puentes muy congestionados y el puente más próximo se encuentra a 600 m.

Las razones estéticas desempeñan también un papel importante en el diseño conceptual del puente. La zona donde se sitúa la pasarela sufre una degradación ambiental apreciable por la presencia tan cercana de la autovía y la ausencia de dispositivos contra el ruido. Aunque la pasarela no va a reducir el nivel de ruido, la presencia de una bella estructura puede incrementar el confort visual además de lo que supone poder vencer la agresión del tráfico al disponer de la posibilidad de pasear por encima de las calzadas y del río a través de un camino transparente y sugestivo tanto de día como de noche (Fotos 1 y 2).

A causa de las mencionadas limitaciones de las pendientes de las rampas y de la presencia de tantas calzadas paralelas, cualquier pasarela que se construya deberá tener forma de U en planta con rampas de acceso de cierta longitud. Por ello parece evidente que es positivo conectar las dos pasarelas en su centro ya que así se hacen los cruces oblicuos más cortos. Los cruces normales al río son más largos que para las pasarelas antiguas pero ello es una consecuencia inevitable de la ausencia de escaleras de acce-

so. Se podría haber conseguido prácticamente la misma función con una disposición en H (cuatro rampas y una única pasarela normal al río) pero los dos tableros en forma de U conectados en el centro son mucho más atractivos desde un punto de vista formal.

Además, los tableros curvos, las rampas y el sistema de cables forman una buena combinación ya que, así, los cables definen superficies alabeadas en el espacio (Foto 3). Éste es un recurso bien conocido que fue usado con éxito por escultores como Anton Pevsner y Naum Gabo en la primera mitad del siglo XX.

La solución atirantada tiene también una ventaja importante: solamente necesita un apoyo intermedio para la torre, que se puede colocar en la estrecha banda comprendida entre una de las calzadas de la M-30 y el río. Todas las pilas están situadas en las bandas comprendidas entre la M-30 y las calles que se encuentran a ambos lados de la autovía. El recurso a la solución atirantada también permite reducir el canto del tablero al mínimo con lo que se aminoran los problemas planteados por el gálibo vertical y la limitación de la pendiente de las rampas.

La posición de la torre debería estar definida por la necesidad de equilibrar las componentes horizontales de todas las fuerzas que se aplican sobre ella. Por ello, debería estar centrada pero, como no se puede situar en el lecho del río, hay que colocarla en una de las márgenes. Esta situación introduce una asimetría en el esquema estático y condiciona muy fuertemente el proyecto y el comportamiento estructural del puente.

El equilibrio de las componentes horizontales de las fuerzas de los cables (Figura 2) explica por sí solo muchas de las características del proyecto. Estas componentes están

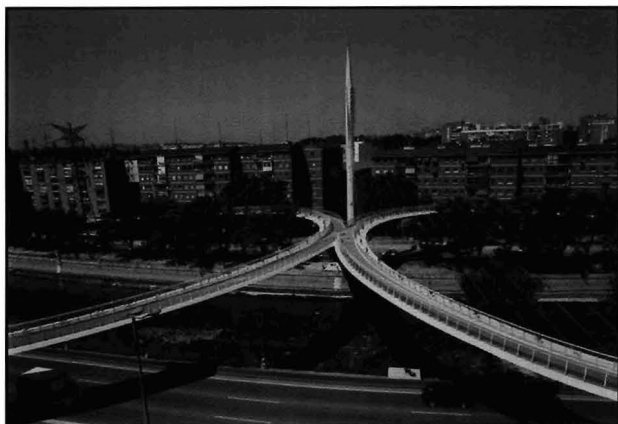


Foto 1.- Vista general de la pasarela.

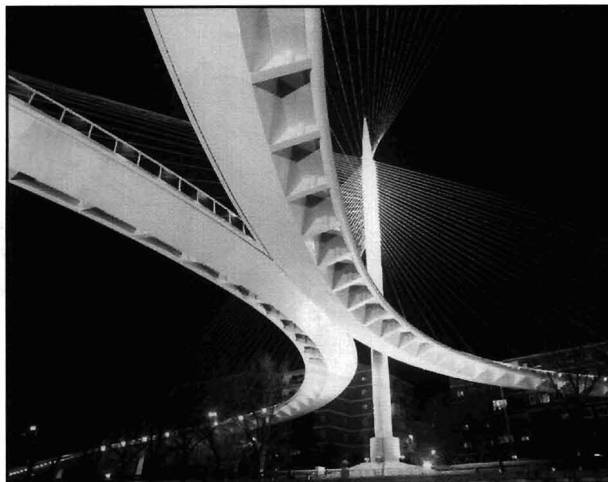


Foto 2.- Unión de las dos pasarelas.

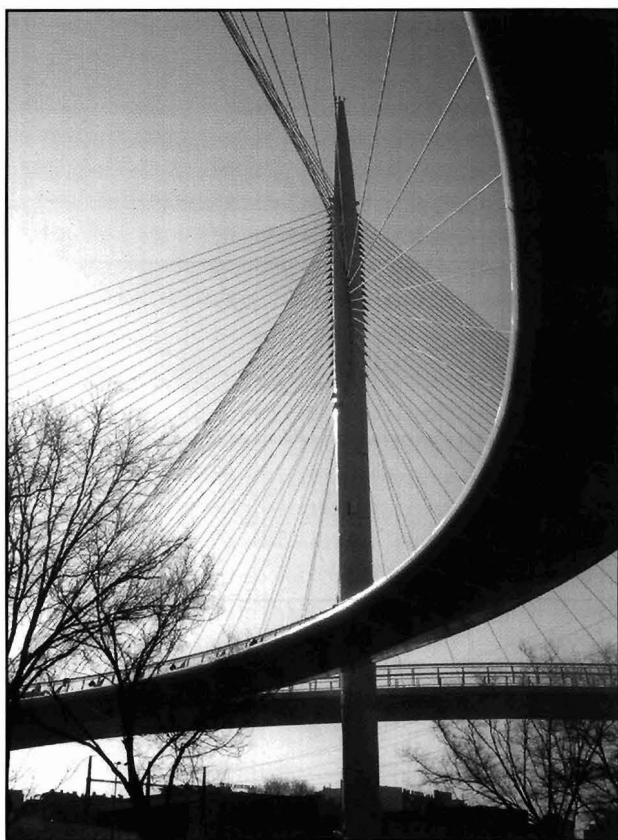


Foto 3.- Sistema de cables de atirantamiento.

equilibradas para minimizar los momentos flectores en la torre. Al no estar situada la torre en el centro del puente, las fuerzas de los cables traseros son bastante mayores que las de los cables delanteros; como consecuencia, la componente vertical de las fuerzas de los cables traseros es mucho mayor que el peso correspondiente del tablero y se hace necesario complementar dicho peso con un relleno de hormigón.

Por otra parte, volviendo a las componentes horizontales de las fuerzas en los cables, su efecto sobre el tablero consiste en una flexión transversal muy importante con una deformación semejante a la de un cascanueces (Figura 3). Como consecuencia, y dado que se trata de un efecto puramente estático, es necesario dotar al tablero de un momento de inercia importante en dirección transversal. Por ello, la sección cajón casi triangular del tablero en las rampas (Figura 4) se rigidiza mediante una chapa horizontal y un tubo de 508 mm de diámetro en la zona atirantada (Figura 5). El papel del tubo consiste en localizar área de acero lejos del centro de gravedad del cajón para incrementar el momento de inercia transversal del conjunto.

Esta solución es al mismo tiempo eficaz desde el punto de vista estructural y estético. La chapa horizontal que co-

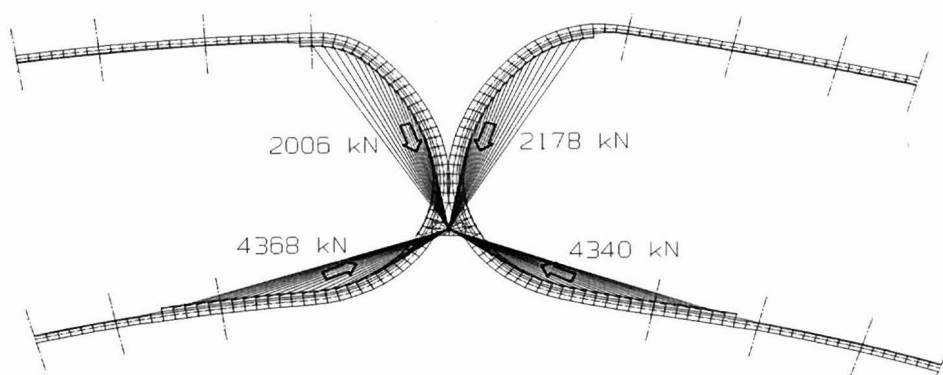


Figura 2.- Equilibrio en planta de las fuerzas en cables para el estado de carga permanente.

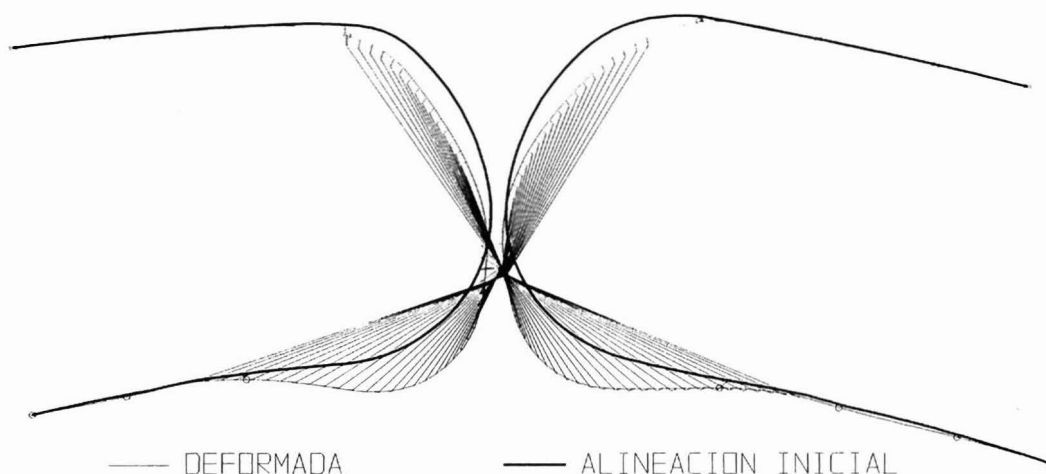


Figura 3.- Deformación ampliada del tablero bajo carga permanente.

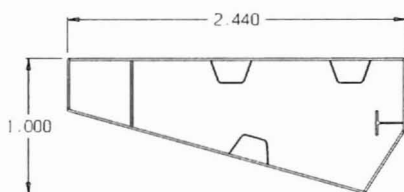


Figura 4.- Sección transversal del tablero en las rampas de acceso.

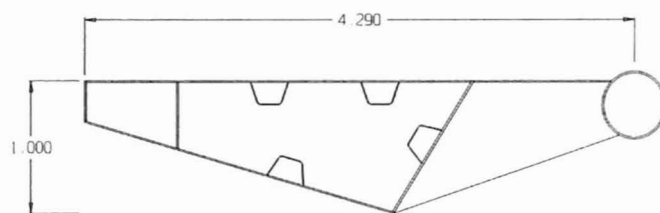


Figura 5.- Sección transversal del tablero en la zona atirantada.

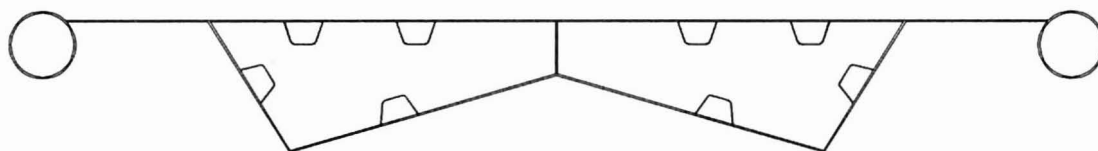


Figura 6.- Sección transversal del tablero en la zona central.

necta el tubo con el cajón triangular tiene 1 m de anchura y sirve también para alojar los anclajes de los cables. En la parte central de la pasarela en donde se conectan los dos tableros, la sección la sección transversal es una combinación de los dos cajones (Figura 6).

Otra de las características importantes del proyecto de esta pasarela se deriva de la observación de las Figuras 2 y 3: para reducir la flexibilidad transversal del tablero y los momentos flectores transversales se hace necesario anclar el tablero en los estribos. De esta manera, al contrario de lo que ocurre en la mayor parte de los puentes atirantados, las fuerzas horizontales de los tirantes no se compensan a lo largo del tablero y tienen que absorberse en los estribos.

La forma natural de absorber las importantes fuerzas horizontales que llegan a los estribos consistiría en disponer anclajes al terreno. Sin embargo, el subsuelo de una gran ciudad suele estar también muy congestionado lo cual desaconseja esta solución y, por ello, se ha optado por fijar los estribos frente a las acciones horizontales mediante micropilotes inclinados (Figura 7).

La torre, de 42 m de altura, tiene una sección circular, con un diámetro variable, entre 1,5 m en la base y 0,3 m en cabeza. Está internamente rigidizada mediante anillos circulares, que se concentran, obviamente, en el tramo en el que se anclan los tirantes (Figura 8). La razón de elegir una sección circular es bastante evidente, al tener que soportar acciones horizontales procedentes de prácticamen-

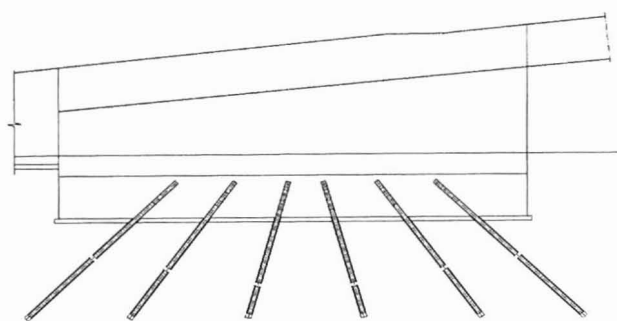


Figura 7.- Cimentación de los estribos.

te cualquier dirección. La variación del diámetro de la torre viene dictada por la distribución de momentos flectores a lo largo de su altura.

Los tirantes son cables cerrados con diámetros comprendidos entre 20 y 40 mm (los mayores diámetros se utilizan para los cables traseros como consecuencia de la magnitud de las fuerzas representadas en la figura 2). Los cables vienen prefabricados con las longitudes que se fijan en proyecto y se anclan en sus dos extremos mediante horquillas y pasadores.

DETALLES ESTRUCTURALES

El cálculo general de la estructura es bastante convencional. Se lleva a cabo mediante un modelo tridimensional de barras con elementos viga (Figura 9). El tipo de análisis es elástico lineal. Sin embargo, una estructura como ésta requiere llevar a cabo cálculos específicos para asegurar la viabilidad de algunos de sus detalles.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los cables se anclan en el tablero contra una chapa horizontal que absorbe las componentes horizontales de la fuerza de cada tirante. Para absorber la componente vertical se disponen

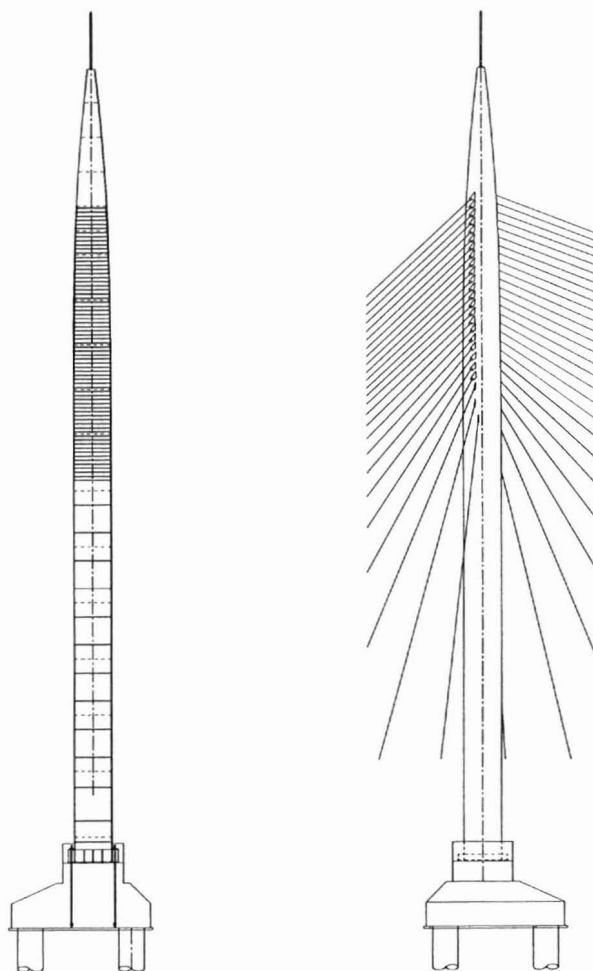


Figura 8.- Sección y alzado de la torre.

unas vigas transversales, una por cada cable. Sin embargo, el mecanismo de transmisión de fuerzas es algo más complicado.

En el proyecto del anclaje intervinieron varios factores relacionados con la construcción. Por un lado se hizo ne-

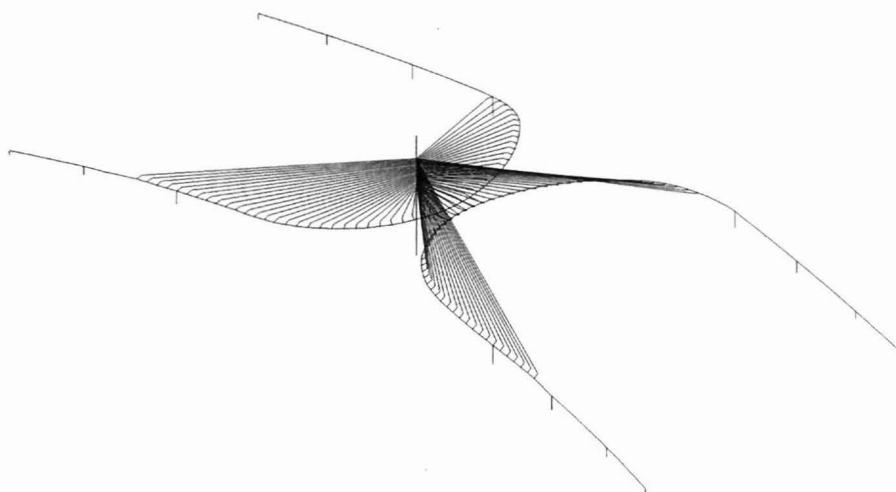


Figura 9.- Modelo general de cálculo.

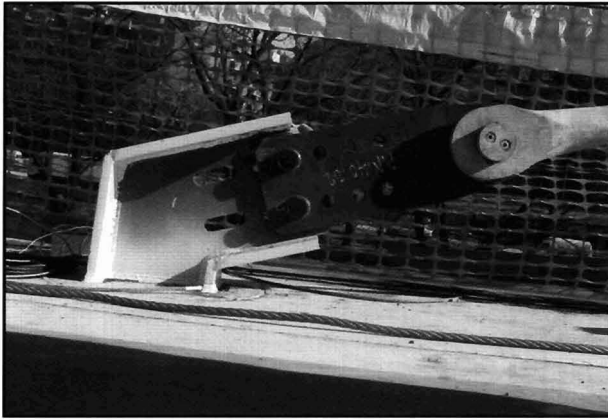


Foto 4.- Anclaje de un cable en el tablero (fase de enganche).



Foto 5.- Anclaje de los cables en el tablero (vista inferior).

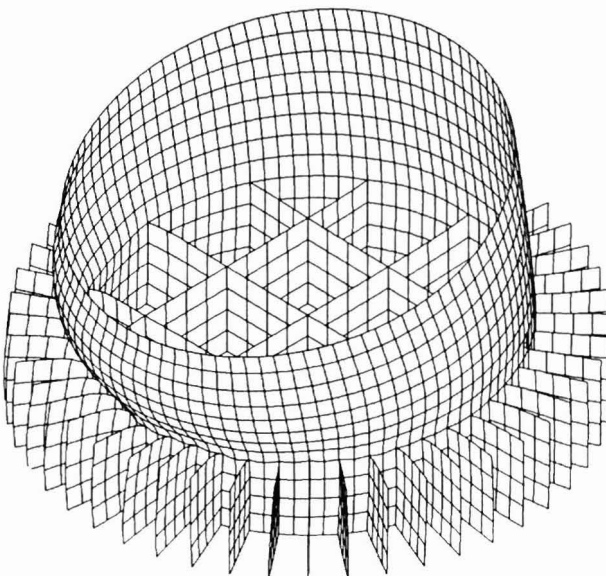


Figura 10.- Modelo deformado de elementos finitos de la base de la torre (deformación ampliada).

cesario dejar una holgura en el anclaje para prever errores de construcción, ya que el cable no dejaba opción a ninguna corrección al venir prefabricado. Por otra parte, las operaciones de tesado de los cables debían realizarse de día y sin cortar el tráfico de la autovía; por esta razón, el contratista prefirió que se colocase el anclaje por encima del tablero y no por debajo como en un principio estaba pensado.

Para cumplir con estos requisitos se proyectó un nuevo tipo de anclaje en el que el pasador transmite la carga a dos chapas que se unen a un elemento soldado al tablero mediante tornillos de alta resistencia a través de taladros rasgados (Foto 4). Por debajo, la conexión a la ménsula transversal se lleva a cabo mediante un tubo partido en dos mitades (Foto 5).

Otro detalle interesante es la conexión de la base de la torre al plinto de hormigón. Esta conexión consiste en una serie de chapas radiales verticales exteriores y una cuadrícula de chapas verticales interiores que sirven de vehículo para la transmisión de esfuerzos axiales y momentos flectores a la chapa de distribución y a las barras de anclaje. Éste es un punto importante ya que se pretende minimizar su importancia formal para destacar la fuerza de la torre como elemento que surge del suelo.

Tanto en el caso de los anclajes de los cables como en el de la base de la torre se utilizaron profusamente modelos de elementos finitos que se analizaron en régimen no lineal para descubrir posibles problemas de inestabilidad. Como ejemplo, se muestra en la Figura 10 la malla deformada correspondiente al estudio de la base de la torre.

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

El comportamiento estructural de la pasarela es muy similar al de cualquier puente atirantado. El aspecto más importante a destacar es su comportamiento ante acciones dinámicas: viento y cargas de uso.

Las frecuencias de vibración de esta pasarela no son especialmente favorables, como ocurre con la mayor parte de las pasarelas a partir de una cierta luz. La frecuencia fundamental es de 0,65 Hz y corresponde al movimiento vertical. Sin embargo, esta pasarela cuenta con dos características favorables. En primer lugar no es una pasarela, sino dos, conectadas de forma que cada una de las dos incrementa la rigidez de la otra. En segundo lugar, su forma curva en planta es un obstáculo para la generación de fuerzas de viento coherentes a lo largo del tablero.

Los posibles efectos aeroelásticos que se estudiaron fueron el flameo, las ráfagas y el desprendimiento de remolinos. El flameo viene impedido por el alto valor de las frecuencias de torsión (ninguna por debajo de 2,63 Hz). Este resultado era el esperado en un puente atirantado de luz media y sección cajón cerrado.

Los efectos dinámicos producidos por las ráfagas de viento se han estudiado también, aunque de forma simplifica-

da mediante la metodología propuesta por el Eurocódigo. Dichos efectos son despreciables ya que las frecuencias de la pasarela no son lo suficientemente bajas.

Los efectos debidos al desprendimiento de remolinos se han evaluado también atendiendo a las recomendaciones del Eurocódigo. Las aceleraciones verticales correspondientes a velocidades de viento frecuentes resultaron inferiores a los valores que se consideran aceptables en la normativa internacional.

Pero el problema más preocupante en una pasarela urbana es el relacionado con su comportamiento frente a las acciones dinámicas producidas por los usuarios. Después de la reciente clausura y reforma de la pasarela del Milenio en Londres a causa de este problema, la comunidad científica y el público en general están más concienciados de la importancia del estudio de este comportamiento.

La primera comprobación a realizar es la propuesta en las Normas Británicas (BS 37/88) que también está recogida en las Recomendaciones para Puentes Metálicos (RPM-95) del Ministerio de Fomento. Está basada en la respuesta de la pasarela ante la acción de un único peatón. Esta pasarela cumple dicha condición aunque no es muy significativa ya que sólo se considera válida cuando el número de usuarios es reducido.

Las nuevas tendencias en la comprobación de pasarelas frente a las vibraciones provocadas por los usuarios consisten en aplicar cargas oscilantes distribuidas a lo largo de todo el tablero con frecuencias coincidentes con alguna de las frecuencias naturales de la pasarela. Esta metodología es la contenida en las nuevas versiones de los Eurocódigos 0 y 1.

Estos cálculos se llevaron a cabo para la pasarela del Manzanares para la frecuencia fundamental y para la frecuencia más próxima a 2 Hz con un amortiguamiento estructural del 0,5% respecto al crítico. Un resultado típico es el representado en la Figura 11 como diagrama temporal de aceleraciones verticales en un punto crítico (el centro del vano principal). Todos los resultados de las comprobaciones fueron satisfactorios y fueron confirmados por las pruebas de carga dinámica que se llevaron a cabo una vez terminada la obra.

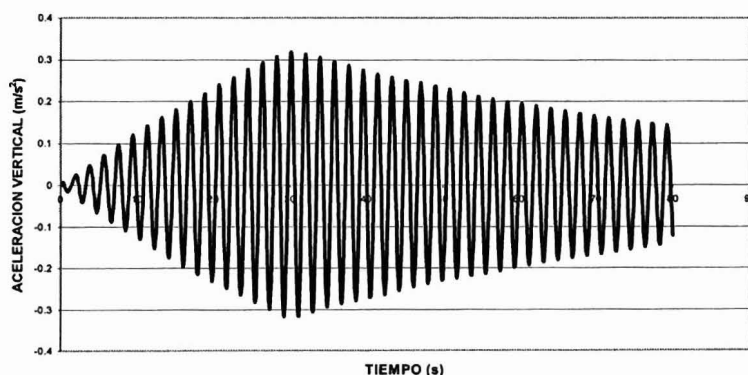


Figura 11.- Aceleración vertical en el centro del vano principal bajo la acción de una carga distribuida periódica.

CONSTRUCCIÓN

El tablero se construyó por tramos de unos 25 m en taller. Estos tramos se montaron en obra sobre apoyos provisionales y se soldaron.

El proceso de montaje y tesado de los cables se estudió muy detalladamente ya que es importante considerar el comportamiento no lineal de los cables a causa de su curvatura.

En una primera fase se montaron todos los cables mediante grúa y se engancharon provisionalmente al tablero como se muestra en la Foto 3; la fuerza a aplicar en esta fase es menor del 15% de la fuerza correspondiente al estado de carga permanente. En una segunda fase se tesaron y se anclaron todos los cables de forma sucesiva hasta su tensión final. En todas las fases del proceso se controlaron los movimientos horizontales de la cabeza de la torre por ser éste el mejor indicador del estado de flexión de la torre, que se ha proyectado fundamentalmente como un puntal trabajando a compresión.

El constructor diseñó un marco de sujeción (Foto 6) de los tirantes que le permitió tesar los cables de forma rápi-



Foto 6.- Marco para tesado de los cables.

da y segura (hay que recordar que las operaciones de montaje y enganche de los cables se hicieron de noche con el tráfico de la autovía cortado pero que la operación de tesado definitivo de los cables se hizo de día, sin interrumpir el tráfico de la autovía).

El proceso completo de enganche y posterior tesado de los cables se ha simulado mediante técnicas de Montecarlo para comprobar la sensibilidad de la torre ante errores aleatorios en las tensiones de los cables. En la Figura 12, por ejemplo, se han dibujado seis leyes de momentos flectores correspondientes a seis cálculos distintos en los que se ha permitido que las fuerzas de montaje de los cables

varíen de forma aleatoria en $\pm 10\%$ respecto a los valores de cálculo. Este resultado demuestra que la influencia de estos errores en la fuerza de tesado no es muy importante para el estado de flexiones en la torre.

CONCLUSIONES

La pasarela atirantada sobre el Manzanares es una estructura que aporta diversas propuestas estructurales innovadoras y se puede considerar que da la respuesta adecuada a los problemas funcionales y estéticos planteados al comenzar el proyecto.

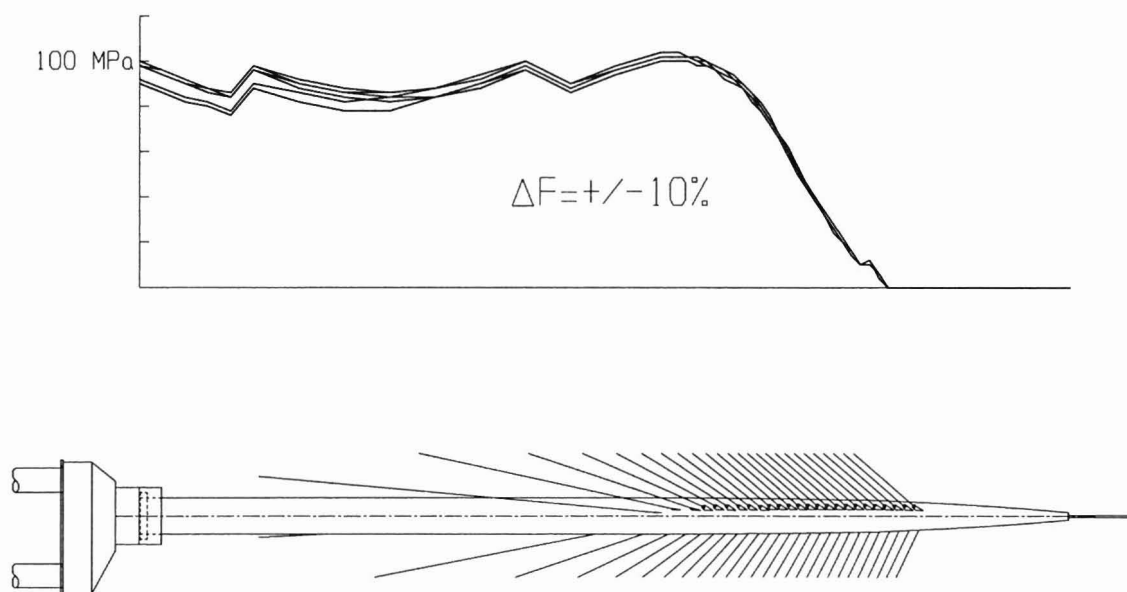


Figura 12.- Distribuciones de momentos flectores en la torre correspondientes a diversas hipótesis de cargas en cables aleatorias.

Ficha Técnica

Propiedad: Ayuntamiento de Madrid
(Fernando Catalá, Francisco Rodríguez-Bernardo)

Proyecto: Carlos Fernández Casado S. L.
(Javier Manterola, Miguel A. Astiz, Miguel A. Gil)

Construcción: FCC (Luis Viñuela, José Martínez Salcedo, Jesús Blanco)

Taller metálico: MEGUSA (Miguel Silvestre)

Cables: Tensoteci (Massimo Marini)

Fecha de terminación: marzo 2003